

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 木枝 香織

本論文は、「風力タービン用翼型に発生するはく離泡および翼性能の数値解析」と題して、風力タービン用翼型まわりの流れ場における3次元流れ構造やはく離現象、特にはく離泡形成の現象解明を目的として、風力タービン用翼型まわりの流れ場を3次元非定常な流れ計算でシミュレートし、風洞実験データとの比較から解析結果の有意性を検討し、はく離泡のメカニズムを考察したものである。

本論文は6章から成っている。第1章では、序論として研究の背景および目的が述べられている。論文提出者は、風力タービン用翼型が変動自然風況下で作動し、本来的に設計点で運転されるわけではないこと、そのために流れの3次元性やはく離特性の予測と現象解明が高性能翼型開発に重大な関心事であること、特に低レイノルズ数 (Re) 領域では、はく離泡の形成により大規模な層流はく離が抑えられることによって翼性能が高く維持されるため、その物理的理解が重要であることを研究の背景として述べている。

第2章では、乱流流れ場の計算手法と研究で用いた計算コードの基本について説明している。特に、非定常3次元流れ解析のための計算コードとして、対流項に2次精度風上スキーム(Quickスキーム)を用いSubgrid scale (SGS) モデルを与えない計算コードと、対流項に4次精度中心スキームを適用し明示的にSGSモデルを用いるLarge Eddy Simulation (LES) コードを構成している。

第3章では、はく離現象を伴う3次元渦構造を解明する出発点として、実験データが豊富で数値解も得られており、はく離・再付着現象が起こる円柱まわり流れを取り上げ、はく離を伴う流れ場の数値解析手法を検証している。その結果、流れの3次元効果を考慮する必要があること、スパン方向の解析領域や解像度が重要であること、数値粘性は慎重な取扱いが必要であることの認識を示している。

また、3次元現象が顕著となる $Re=1000$ の流れ場で、揚力、効力の時間変動に現れたうなり現象の原因をスペクトル解析から検討し、うなり現象発生時の3次元渦構造を明らかにしている。

第4章では、風力タービン用翼型 MEL012 について、実験的に層流はく離泡の形成が確認された $Re=200,000$ 、迎え角4度の条件で流れ解析を実施し、はく離泡シミュレーションの可能性を調べている。はく離泡が形成される領域に十分な解像度の格子を用いた場合、翼まわりの圧力分布に実験結果と同様な不連続部が現れ、はく離泡の形成が捉えられることを明らかにしている。

はく離泡のメカニズムに関しては、シミュレートされた流れ場の可視化結果より、はく離した層流境界層の発達と渦への巻き上がり、その後の渦構造の3次元的な複雑化の過程が支配することを明らかにしており、流れの可視化実験結果との比較からその有意性を確認している。

解析手法に関しては、対流項に2次精度風上スキーム(QUICKスキーム)を用いSGSモデルを与えない計算コードと、対流項に4次精度中心スキームを適用しダイナミックSGSモデルを用いるLES計算との2通りを実施し、後者の解析結果は前者より時間平均値において実験値とより良く一致し精度が高いこと、はく離泡形成のような大規模流れ構造には両者に相違はみられないことを指摘している。LESのSGSモデルに関しては、モデル係数の値が固定されるSmagorinskyモデルではなく、求めた流れ場から動的にモデル係数を導き層流領域で渦粘性が0に漸近するダイナミックSGSモデルの適用が必要であることを確認している。また、LESの計算に関して、対流項に中心スキームを適用したことにより現れる速度場の振動を抑えるために、速度場に陽的にかけるFilterの強さを任意に変更する計算手法を提案し、安定に計算を進める済めるためのFilterの強さと回数組み合わせに関する実用的提案を行っている。

第5章では、風力タービン用翼型 M-F071 まわりの流れ場の3次元計算を、はく離泡形成が確かめられている $Re=200,000$ 、迎え角 10 度の設定で実施し、はく離泡のシミュレーションに再現性があることを確認している。このような流れ場に対して2次元計算の結果は、たとえ解像度の高い格子を用いても流れ場の3次元性が顕著になる再付着点より下流領域で流れ場を精度良く再現しないことを指摘している。

次に、変動量の比較検証のため、風洞実験で得られた圧力の時間変動とそのパワースペクトルを、3次元計算結果と比較している。はく離泡が形成される領域において、計算結果は実験結果と定性的に一致し、シミュレーションで得られたはく離泡の流れ構造が実験結果によって裏付けられたと述べている。さらに計算結果による流れの可視化結果から、渦がもっとも発達した領域では壁面との干渉による2次渦の形成が観察されることを明かにしている。この領域の圧力パワースペクトルには、実験結果、計算結果ともに2つのピークが現れたが、これらのピークはこの2次渦に起因することを指摘しており、実験結果だけからでは理解し難い現象解明を実験結果にシミュレーション結果を合わせることに達成されることを示唆している。

第6章では、全体の結論と今後の課題が述べられている。

以上を要約すると、本研究において風力タービン用翼型の流れ場におけるはく離泡形成のメカニズムが明らかとなり、はく離を伴う流れ場の数値解析手法に関して多くの重要な知見が与えられている。従って、本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格であると認められる。